

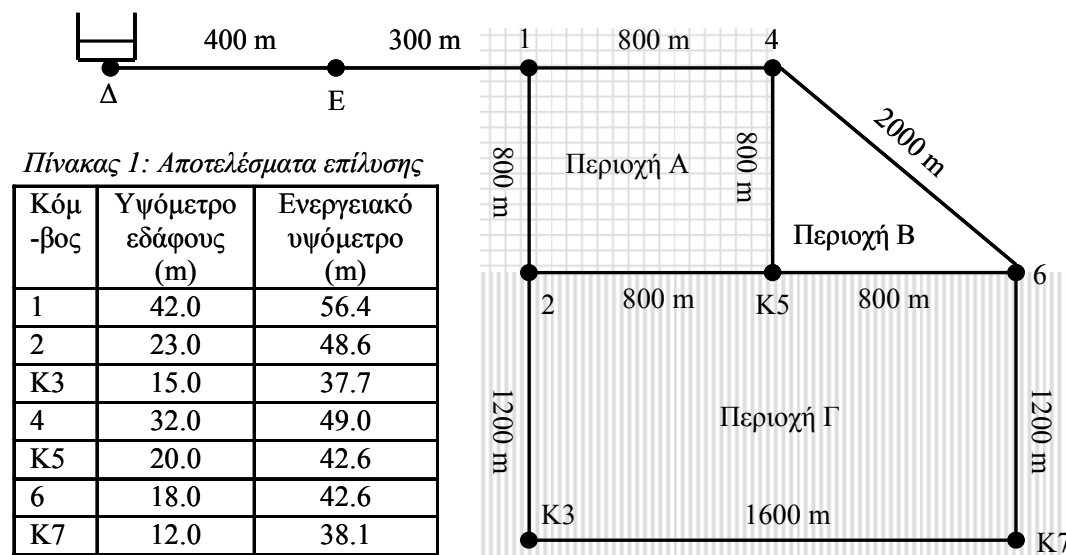
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Σχολή Πολιτικών Μηχανικών – Τομέας Υδατικών Πόρων
Μάθημα: Τυπικά Υδραυλικά Έργα – Μέρος 2: Δίκτυα διανομής

Άσκηση ΔΕ5: Τροφοδοσία μονάδας επεξεργασίας αγροτικών προϊόντων

(Εξέταση προόδου Μαΐου 2005)

Σύνταξη και επίλυση άσκησης: Α. Ευστρατιάδης και Δ. Παναγούλια

Στο Σχήμα απεικονίζεται το πρωτεύον δίκτυο διανομής οικισμού, τα μήκη των κλάδων και οι θέσεις των πυροσβεστικών κρουνών, ονομαστικής παροχής 5 L/s (επισημαίνονται με «Κ»). Οι οικισμοί, στον οποίο αναπτύσσονται αποκλειστικά αστικές χρήσεις, περιλαμβάνει τρεις περιοχές δόμησης, με ενιαίο συντελεστή κάλυψης. Στην περιοχή Α αναπτύσσονται διώροφες κατοικίες, στην περιοχή Β τριώροφες, ενώ στην περιοχή Γ τετραώροφες. Η παροχή σχεδιασμού, σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, είναι 20 L/s. Το δίκτυο τροφοδοτείται από τη δεξαμενή Δ, ωφέλιμης χωρητικότητας 350 m³ και ελάχιστης στάθμης ύδατος +65 m. Ο κύριος τροφοδοτικός αγωγός, που λειτουργεί επί 30 έτη, είναι από υλικό PVC, κλάσης 10 atm, και έχει ενιαία διάμετρο Φ200 mm. Στη θέση Ε μελετάται η υδροδότηση μιας μονάδας επεξεργασίας αγροτικών προϊόντων, 8ωρης λειτουργίας καθημερινά.



Πίνακας 1: Αποτελέσματα επίλυσης

Κόμβος	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ενεργειακό υψόμετρο (m)
1	42.0	56.4
2	23.0	48.6
K3	15.0	37.7
4	32.0	49.0
K5	20.0	42.6
6	18.0	42.6
K7	12.0	38.1

Πίνακας 2: Κατανομή αστικής ζήτησης

Χρονικό διάστημα (ώρες)	0-4	4-8	8-12	12-16	16-20	20-24
Ποσοστό αστικής ζήτησης (%)	5.0	12.0	22.0	19.0	26.0	16.0

Ζητούνται:

1. Να εκτιμηθεί η παροχή εξόδου στον κόμβο Κ5, σε συνθήκες κανονικής και έκτακτης λειτουργίας του δικτύου.
2. Το μοντέλο δικτύου έχει επιλυθεί για ένα δυσμενές σενάριο λειτουργίας, που υποθέτει ταυτόχρονη ενεργοποίηση δύο κρουνών. Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 1. Ποια είναι η μέγιστη ημερήσια παροχή που μπορεί να δοθεί στη μονάδα επεξεργασίας μέσω του κόμβου Ε, χωρίς να προκαλούνται προβλήματα πιέσεων στο κατάντη δίκτυο;
3. Έστω ότι η μονάδα επεξεργασίας καταναλώνει 100 m³ ανά ημέρα, λειτουργώντας συνεχώς από τις 8:00 π.μ. έως τις 4:00 μ.μ. Στον Πίνακα 2 δίνεται η τυπική διακύμανση της αστικής κατανάλωσης ανά

4ωρο. Να εκτιμηθεί ο διαθέσιμος όγκος ασφαλείας της δεξαμενής, με δεδομένο ότι το εξωτερικό υδραγωγείο λειτουργεί με βαρύτητα.

Λύση ερωτήματος 1

Ο οικισμός εξυπηρετεί αποκλειστικά αστική χρήση νερού, με γνωστή τιμή σχεδιασμού Q , η οποία κατανέμεται στους κόμβους του δικτύου, με βάση τα ισοδύναμα μήκη των κλάδων που συντρέχουν σε κάθε κόμβο. Το ισοδύναμο μήκος επιρροής κάθε κλάδου (i, j) δίνεται από τη σχέση:

$$L_{ij}^* = 0.5 \theta_{ij} L_{ij}$$

όπου L_{ij} το πραγματικό μήκος του κλάδου και θ_{ij} συντελεστής που εκφράζει την ανομοιομορφία της κατανάλωσης νερού κατά μήκος του κλάδου. Με την υπόθεση ότι ο λόγος της παροχής εξόδου κάθε κόμβου c_i προς την ολική παροχή Q είναι ίσος με το λόγο του ισοδύναμου μήκους του κόμβου L_i^* προς το συνολικό ισοδύναμο μήκος του δικτύου L^* , προκύπτει η σχέση αναλογίας:

$$c_i = Q L_i^* / L^*$$

Αφού στον οικισμό αναπτύσσονται διαφορετικά ύψη κτηρίων, η πυκνότητα του πληθυσμού είναι ανομοιόμορφη, άρα και η κατανομή της ζήτησης είναι ανομοιόμορφη. Θέτοντας $\theta = 1$ για την περιοχή μέγιστης πυκνότητας, ήτοι την Γ όπου αναπτύσσονται 4ώροφα κτήρια, οι αντίστοιχοι συντελεστές ανομοιομορφίας για τις περιοχές Α και Β θα είναι $\theta = 2 / 4 = 0.50$ και $\theta = 3 / 4 = 0.75$, αντίστοιχα. Οι εν λόγω τιμές ισχύουν για τους κλάδους που διέρχονται αποκλειστικά από μία περιοχή, διαφορετικά θεωρείται ο μέσος όρος των τιμών του συντελεστή θ εκατέρωθεν του κλάδου. Με βάση την παραδοχή αυτή, προκύπτει $\theta_{25} = (1 + 0.5) / 2 = 0.75$, $\theta_{45} = (0.5 + 0.75) / 2 = 0.625$ και $\theta_{56} = (1 + 0.75) / 2 = 0.875$. Τέλος, για τον κύριο τροφοδοτικό αγωγό, η τιμή του συντελεστή θ είναι μηδέν, αφού κατά μήκος της διαδρομή Δ-1 δεν τροφοδοτούνται κατανεμημένοι καταναλωτές.

Με τις παραπάνω παραδοχές, η εκτίμηση των ισοδύναμων μηκών επιρροής κάθε κόμβου γίνεται ως εξής:

$$L_1^* = L_{12}^* + L_{14}^* = 0.5 \times 0.5 \times 800 + 0.5 \times 0.5 \times 800 = 400 \text{ m}$$

$$L_2^* = L_{21}^* + L_{23}^* + L_{25}^* = 0.5 \times 0.5 \times 800 + 0.5 \times 1 \times 1200 + 0.5 \times 0.75 \times 800 = 1100 \text{ m}$$

$$L_3^* = L_{32}^* + L_{37}^* = 0.5 \times 1 \times 1200 + 0.5 \times 1 \times 1600 = 1400 \text{ m}$$

$$L_4^* = L_{41}^* + L_{45}^* + L_{46}^* = 0.5 \times 0.5 \times 800 + 0.5 \times 0.625 \times 800 + 0.5 \times 0.75 \times 2000 = 1200 \text{ m}$$

$$L_5^* = L_{52}^* + L_{54}^* + L_{56}^* = 0.5 \times 0.75 \times 800 + 0.5 \times 0.625 \times 800 + 0.5 \times 0.875 \times 800 = 900 \text{ m}$$

$$L_6^* = L_{64}^* + L_{65}^* + L_{67}^* = 0.5 \times 0.75 \times 2000 + 0.5 \times 0.625 \times 800 + 0.5 \times 1 \times 1200 = 1700 \text{ m}$$

$$L_7^* = L_3^* = 1400 \text{ m (λόγω συμμετρίας)}$$

Το ολικό ισοδύναμο μήκος του δικτύου είναι $L^* = 8100 \text{ m}$. Συνεπώς, για παροχή σχεδιασμού $Q = 20 \text{ L/s}$, η παροχή εξόδου του κόμβου Κ5 σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας είναι ίση με:

$$c_5 = 20 \times 1800 / 8100 = 2.2 \text{ L/s}$$

Σε συνθήκες έκτακτης λειτουργίας, στην παραπάνω ποσότητα προστίθεται η παροχή πυρκαγιάς του πυροσβεστικού κρουνού, ήτοι 5 L/s .

Λύση ερωτήματος 2

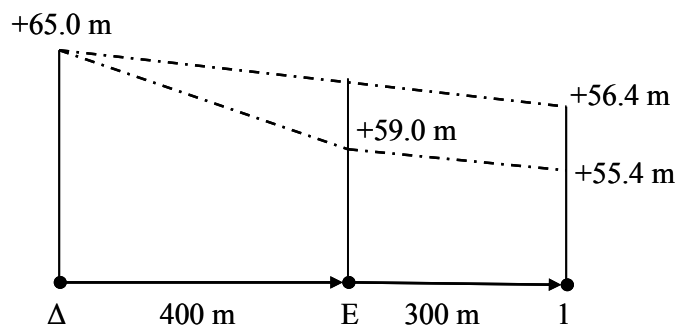
Στον Πίνακα 3 δίνονται τα αποτελέσματα του ελέγχου ελάχιστων πιέσεων στο δίκτυο. Οι πιέσεις των κόμβων υπολογίζονται αφαιρώντας από το ενεργειακό υψόμετρο, όπως προκύπτει από την επίλυση του δικτύου, το υψόμετρο εδάφους. Η απαιτούμενη πίεση σε κάθε κόμβο εξαρτάται από το ύψος των

κτηρίων. Συγκεκριμένα, στην περιοχή Α, όπου αναπτύσσονται διώροφες κατοικίες, θεωρώντας για τυπικό ύψος ορόφου 3.0 m και ενεργειακές απώλειες 1.0 m ανά όροφο, το ελάχιστο αποδεκτό ύψος πίεσης είναι 12 m. Ομοίως, στις περιοχές Β και Γ, όπου αναπτύσσονται τριώροφα και τετρώροφα κτήρια, το απαιτούμενο ύψος πίεσης ανέρχεται σε 16 και 20 m, αντίστοιχα.

Πίνακας 3: Έλεγχος ελάχιστων πιέσεων στο δίκτυο.

Κόμβος	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ενεργειακό υψόμετρο (m)	Ύψος πίεσης (m)	Απαιτούμενη πίεση (m)	Διαφορά (m)
1	42.0	56.4	14.4	12.0	2.4
2	23.0	48.6	25.6	20.0	5.6
K3	15.0	37.7	22.7	20.0	2.7
4	32.0	49.0	17.0	16.0	1.0
K5	20.0	42.6	22.6	20.0	2.6
6	18.0	42.6	24.6	20.0	4.6
K7	12.0	38.1	26.1	20.0	6.1

Από τον έλεγχο προκύπτει ότι ο δυσμενέστερος κόμβος είναι ο 4, που εξυπηρετεί τριώροφα κτήρια, και στον οποίο το περιθώριο πτώσης της πίεσης ανέρχεται σε 1.0 m. Αυτό σημαίνει ότι η παροχή που μπορεί να δοθεί μέσω του κύριου τροφοδοτικού αγωγού προς τον κόμβο E, χωρίς να προκαλούνται προβλήματα πιέσεων στο δίκτυο, θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε οι γραμμικές ενεργειακές απώλειες κατά μήκος της διαδρομής ΔE να αυξηθούν κατά 1.0 m, το μέγιστο. Αυτό σημαίνει ότι η στάθμη της πιεζομετρικής γραμμής θα μειωθεί ισόποσα σε όλους τους κατάντη κόμβους, με συνέπεια το δίκτυο να παρέχει οριακά αποδεκτή πίεση σε όλη την έκταση του οικισμού.



Η αρχική τιμή του ενεργειακού υψομέτρου του κόμβου E δίνεται από τη σχέση:

$$h_E = h_\Delta - J_{\Delta E} L_{\Delta E}$$

όπου $h_\Delta = 65.0$ m (στάθμη δεξαμενής), $L_{\Delta E} = 400$ m και $J_{\Delta E}$ η κλίση της πιεζομετρικής γραμμής. Αφού αρχικά δεν υπάρχει κατανάλωση νερού μέσω του κόμβου E, η τελευταία είναι σταθερή καθ' όλο το μήκος του κύριου τροφοδοτικού αγωγού Δ-E-1, οπότε (βλ. σκαρίφημα):

$$J_{\Delta E} = J_{E1} = J_{\Delta 1} = (h_\Delta - h_1) / L_{\Delta 1} = (65.0 - 56.4) / 700 = 0.0123$$

Με την παροχέτευση επιπρόσθετης παροχής κατά τη διαδρομή Δ-E για την τροφοδοσία της μονάδας επεξεργασίας μέσω του κόμβου E, η κλίση της πιεζομετρικής γραμμής που υπολογίστηκε αρχικά θα διατηρηθεί μόνο κατά μήκος της διαδρομής E-1, στο οποίο δεν μεταβάλλεται η παροχή, ενώ κατά μήκος της διαδρομής Δ-E θα αυξηθεί. Θεωρώντας επιτρεπόμενη μείωση της πίεσης του κόμβου 1 κατά 1.0 m, και συνεπώς νέο ενεργειακό υψόμετρο $h_1' = 55.4$ m, υπολογίζεται το νέο ενεργειακό υψόμετρο του κόμβου E από τη σχέση:

$$h_E' = h_1' + J_{\Delta E} L_{\Delta E} = 55.4 + 0.0123 \times 300 = 59.0 \text{ m}$$

Λόγω της επιπρόσθετης παροχής για την τροφοδοσία της μονάδας επεξεργασίας, οι τελικές γραμμικές ενεργειακές απώλειες από τη δεξαμενή Δ προς τον κόμβο Ε θα είναι ίσες με:

$$\Delta h_{\Delta E} = h_{\Delta} - h_E = 65.0 - 59.0 = 6.0 \text{ m}$$

Για αγωγό εμπορίου από υλικό PVC, κλάσης 10 atm, διαμέτρου $\Phi 200$ mm, η εσωτερική διάμετρος είναι ίση με 180.8 mm. Αφού ο αγωγός λειτουργεί επί 30 έτη, εκτιμάται ότι ο συντελεστής τραχύτητας είναι $k_s = 1.0$ mm. Η εκτίμηση της διερχόμενης παροχής Q προϋποθέτει επίλυση του 2^{ου} θεμελιώδους υδραυλικού προβλήματος, για δεδομένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού ($L = 400$ m, $D = 180.8$ mm, $k_s = 1.0$ mm) και δεδομένες ενεργειακές απώλειες ($h_f = 6.0$ m). Χρησιμοποιείται η σχέση Darcy-Weisbach:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{f}} \frac{\pi D^{5/2}}{4} \sqrt{\frac{2 g h_f}{L}}$$

όπου ο συντελεστής απωλειών f εκτιμάται από την πεπλεγμένη σχέση των Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[\frac{k_s}{3.71D} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right]$$

Αρχικά, υπολογίζεται η παράσταση:

$$\text{Re} \sqrt{f} = \sqrt{\frac{2 g h_f D^{3/2}}{L \nu}} = 36444.1$$

όπου ν η κινηματική συνεκτικότητα του νερού, που ισούται με 1.14×10^{-6} m²/s. Στη συνέχεια, εισάγεται ο όρος $\text{Re} \sqrt{f}$ στη σχέση Colebrook-White και υπολογίζεται η παράσταση $1 / \sqrt{f} = 5.614$. Τέλος, από τη σχέση Darcy-Weisbach υπολογίζεται η ζητούμενη παροχή του αγωγού, που προκύπτει ίση με $Q = 0.0331$ m³/s ή 33.1 L/s.

Αρχικά, μέσω του αγωγού ΔΕ μεταφερόταν παροχή 30.0 L/s, αποκλειστικά για την τροφοδοσία του οικισμού. Η επιπρόσθετη παροχή των 3.1 L/s αντιστοιχεί στη ζητούμενη μέγιστη επιτρεπόμενη τροφοδοσία της βιομηχανικής μονάδας.

Λύση ερωτήματος 3

Για δεδομένες διαστάσεις δεξαμενής, ο όγκος ασφαλείας θα είναι η διαφορά της ωφέλιμης χωρητικότητας από την όγκο ρύθμισης. Ο τελευταίος εξαρτάται από τη διακύμανση της ημερήσιας κατανάλωσης στον οικισμό και τη βιομηχανική μονάδα.

Δίνεται ότι η παροχή σχεδιασμού του δικτύου, ήτοι η μέγιστη ωριαία παροχή του οικισμού, ανέρχεται σε 20.0 L/s. Για αστική χρήση νερού, ο συντελεστής ωριαίας αιχμής εκτιμάται σε $\lambda_2 = 2.0$. Συνεπώς, η μέγιστη ημερήσια παροχή του οικισμού ανέρχεται σε $20.0 / 2.0 = 10.0$ L/s. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ημερήσιο όγκο ζήτησης 864 m³. Από την άλλη πλευρά, η ημερήσια κατανάλωση στη μονάδα επεξεργασίας (100 m³) είναι σταθερή στη διάρκεια του έτους (συνεπώς $\lambda_1 = 1$), και πραγματοποιείται ομοιόμορφα μέσα σε ένα διάστημα 8 ωρών. Τέλος, αφού η δεξαμενή τροφοδοτείται από αγωγό βαρύτητας, η εισερχόμενη παροχή θα είναι σταθερή κατά τη διάρκεια του 24ώρου. Συνεπώς, κάθε 4ωρο θα μεταφέρονται από το εξωτερικό υδραγωγείο $964 / 6 = 160.7$ m³ νερού. Με βάση τα παραπάνω, μπορεί να κατασκευαστεί η καμπύλη εισροών-εκροών νερού από τη δεξαμενή (Πίνακας 4). Από τα στοιχεία του πίνακα προκύπτει ότι η μέγιστη περίσσεια νερού, ήτοι 174.5 m³, εμφανίζεται κατά το χρονικό διάστημα 4-8 π.μ., ενώ το μέγιστο έλλειμμα, ήτοι 22.4 m³, κατά το διάστημα 16-20 μ.μ. Ο όγκος ρύθμισης είναι $174.5 + 22.4 = 196.9$ m³, οπότε ο υπολειπόμενο όγκος της δεξαμενής για την αντιμετώπιση έκτακτων περιστατικών (όγκος ασφαλείας) είναι $350.0 - 196.9 = 153.1$ m³.

Πίνακας 4: Χρονική διακύμανση εισροών-εκροών νερού από τη δεξαμενή.

Ωρα	Εισροή (m ³)	Αστική ζήτηση (%)	Αστική ζήτηση (m ³)	Βιομηχανική ζήτηση (m ³)	Ολική εκροή (m ³)	Αθροιστική εισροή (m ³)	Αθροιστική εκροή (m ³)	Διαφορά (m ³)
0-4	160.7	5.0	43.2	0.0	43.2	160.7	43.2	117.5
4-8	160.7	12.0	103.7	0.0	103.7	321.3	146.9	174.5
8-12	160.7	22.0	190.1	50.0	240.1	482.0	387.0	95.0
12-16	160.7	19.0	164.2	50.0	214.2	642.7	601.1	41.5
16-20	160.7	26.0	224.6	0.0	224.6	803.3	825.8	-22.4
20-24	160.7	16.0	138.2	0.0	138.2	964.0	964.0	0.0